

Artículo

Patrones de concentración de carbono negro y principales fuentes de emisión en Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Patterns of black carbon concentration and determination of its main emission sources in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico

Frida Yael Toquinto-Manjarrez¹, Felipe Adrián Vázquez-Galvez¹, Yazmín Guadalupe Hernández-García^{1*}, Luis Gerardo Bernadac-Villegas¹, Sergio Saúl Solís¹, Marisela Yadira Soto-Padilla¹, Miguel Domínguez-Acosta¹, Gilberto Velázquez-Angulo¹, Edith Flores-Tavizón¹, Alfredo Granados-Olivas¹.

¹Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Del Charro 610 Nte. Partido Romero C.P. 32310. 656-688-48-002

*Correspondencia: Correo electrónico: yazmin.hernandez@uach.mx (Yazmín Guadalupe Hernández-García)

Recibido: 26 de febrero de 2020; **Aceptado:** 27 de junio de 2020

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, Dirección de Investigación y Posgrado.

Resumen

El carbono negro (CN) es un contaminante atmosférico producido de forma natural y como resultado de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. La región Paso del Norte (México-Estados Unidos) no cuenta con monitoreo continuo de CN, aun cuando México tiene la meta internacional de reducir sus emisiones en 51% para el 2030. El objetivo de este estudio fue evaluar el patrón de comportamiento del CN y su correlación con óxido de nitrógeno (NOx) y carbono (CO) por su asociación a emisiones vehiculares a diésel. El monitoreo fue de octubre de 2018 a marzo de 2019 por ser los meses del año más fríos y de mayor estabilidad atmosférica en la región. Las concentraciones de CN, todos los contaminantes criterio y la meteorología se determinaron mediante etalómetro, analizadores Teledyne y estación meteorológica Campbell Scientific en la estación de referencia científica IIT-01 en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. La correlación de Spearman arrojó una CO y NOx de $R=0.735$ y entre CO y CN de $R=0.704$. Los resultados apoyan la relación significativa entre CN y NOx de $R=0.794$. Los resultados apoyan la posibilidad de que la fuente del CN está asociada al tráfico vehicular y a su patrón típico de comportamiento. Además de que la correlación significativa entre el CO y CN permitirá realizar estimaciones sobre el comportamiento del CN en base a las concentraciones de CO registradas por otras estaciones.

Palabras clave: contaminación atmosférica, contaminantes criterio, combustibles fósiles, quema de biomasa, zona fronteriza Paso del Norte.

Abstract

Black carbon (CN) is an atmospheric pollutant produced naturally and as a result of incomplete

combustion of fossil fuels, biofuels and biomass. The Paso del Norte region (Mexico-USA) does not have continuous CN monitoring, even though Mexico has the international goal of reducing CN emissions by 51% by 2030. The objective was to assess the CN's behavior pattern and its correlation with nitrogen oxides (NO_x) and carbon (CO) as a proxy to diesel vehicles. The monitoring was from October 2018 to March 2019 because of the relative atmospheric stability associated to the cold months in the region. CN concentrations were determined with an aethalometer, criteria air pollutants by Teledyne analyzers and the meteorology by a Campbell Scientific automatic station at the IIT-01 reference station in Ciudad Juarez, Chihuahua, México. The Spearman correlation showed a significant relation between CN and NO_x of $R = 0.794$, between CO and NO_x of $R = 0.735$ and between CO and CN of $R = 0.704$. Result support the inference that CN is associated with vehicular traffic. In addition, the significant correlation between CO and CN will allow estimate the relative presence of the CN based on the CO concentrations recorded by other stations within the basin.

Keywords: atmospheric pollution, biomass burning, fossil fuels, pollutants criterion, Paso del Norte border zone.

1. Introducción

El carbono negro (CN) es un contaminante atmosférico de importancia a nivel global debido a su notable aportación al cambio climático. Esto funciona dispersando la luz solar entrante fuera de la superficie de la tierra, afectando la temperatura, calentando la atmósfera y cambiando el balance radiativo de la tierra. La emisión antropogénica de este ocupa el segundo lugar en la capacidad de generar un forzamiento radiativo positivo en la atmósfera (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Se ha sugerido que el mitigar de forma temprana las concentraciones de CN, así como los precursores de ozono (O₃), permitirá ganar tiempo para que las estrategias de sumideros de carbono sean viables bajo un mecanismo parecido al Protocolo de Montreal (Molina et al., 2009). Además, el CN se ha asociado con ciertos padecimientos típicamente asociado al material particulado fino (PM_{2.5}), ya que estas pueden alcanzar zonas profundas del sistema respiratorio, aumentando la incidencia de afecciones pulmonares (Díaz, 2016).

El CN es un aerosol emitido a la atmósfera como parte de la fracción de PM_{2.5} y generado de forma principal a consecuencia de una combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa (Bond et al., 2013; Lim et al., 2014). Es emitido en conjunto con otros aerosoles y es de esta interacción, junto con las características químicas derivadas de su fuente de emisión, lo que le imprime propiedades toxicológicas (Long et al., 2013).

El CN forma parte de los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), tiene un tiempo de residencia medio de días a semanas en comparación con el bióxido de carbono (CO₂) que puede llegar a ser de cientos de años; sin embargo, no se ha determinado el tiempo de residencia específica, el cual difiere de acuerdo con la región donde se calcule (Molina et al., 2009; Cape et al., 2012).

Como parte de la respuesta para disminuir los efectos del cambio climático, en 2016 varios países han firmado el Acuerdo de París, para lo cual, el gobierno mexicano ha planteado una nueva estrategia de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y CN. La estrategia establece como meta la reducción de emisiones de CN en 51% para el año 2030, tomando como línea base la tendencia actual proyectada hacia el 2030, lo que representa una reducción de 152 mil toneladas métricas (tnm) a 75 mil tnm (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2015). Por tanto,

como parte de los esfuerzos para monitorear y modelar las reducciones pactadas, se requiere de establecer las variaciones espacio tiempo, así como las principales fuentes de emisión.

Varios estudios han encontrado que los principales contribuyentes a las emisiones de CN son el tráfico vehicular y su comportamiento de movilidad; así como la relación entre las concentraciones de este contaminante y los patrones climatológicos sinópticos y de mesoescala (Novakov y Hansen, 2004; Raju et al., 2011; Kalluri et al., 2017; Chand et al., 2018; Hussain et al., 2018; Ježek et al., 2018; Kutzner et al., 2018).

Lugares como Buenos Aires, Argentina y algunas entidades federativas de México, han llevado a cabo campañas de monitoreo de CN y de la huella característica por las emisiones de quema de biomasa, particularmente de incendios forestales, dando como resultado la afectación de ecosistemas y un aumento significativo de las concentraciones del contaminante, ocasionando un comportamiento anormal en las tendencias de CN para las zonas identificadas (Subramanian et al., 2010; Resquin et al., 2018).

En 2006 se realizó una campaña de medición de concentraciones de CN en relación con el tránsito vehicular en la zona fronteriza de México y Estados Unidos, donde las ciudades mexicanas de Mexicali y de Ciudad Juárez fueron las que mostraron mayor contribución de CN. La conclusión del estudio fue que el transporte de carga media, dentro del lado fronterizo mexicano, es el principal contribuyente de CN y además se recomendó la necesidad de realizar investigaciones a fondo sobre la situación, dado que se percibieron ciertas desventajas con respecto a la metodología utilizada, tales como: una inherente ambigüedad derivadas de las cambiantes condiciones de viento en la región y la incapacidad de definir satisfactoriamente la procedencia real de algunos automóviles (Kelly et al., 2006).

En el 2010, en Ciudad Juárez se llevó a cabo un proyecto cuya principal finalidad fue mejorar el proceso de fabricación de ladrillos. Como parte complementaria al estudio se estimó que de la cuenca atmosférica Paso del Norte, Ciudad Juárez fue la ciudad que mayormente contribuía a emisiones de partículas suspendidas y de CN, con su consecuente incremento en los índices de mortalidad (Blackman et al., 2006; Molina, 2010).

A partir de 2017, por iniciativa del Instituto Nacional de Cambio Climático (INECC) de México y la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), se inició el monitoreo continuo de CN. Uno de los objetivos de dicha iniciativa es contribuir al conocimiento de los patrones de concentraciones medias y fuentes de emisión del CN y demás contaminantes criterio en la región internacional. El análisis de las concentraciones de contaminantes permitirá establecer el nivel de asociación con las concentraciones de CN, con el fin de determinar los procesos que las producen y su metabolismo en la atmósfera. Estos contaminantes son el óxido de nitrógeno (NO_x) que en los ambientes urbanos son producidos principalmente por la oxidación de nitrógeno a altas temperaturas, en máquinas de combustión interna y hornos industriales de alta temperatura, y el monóxido de carbono (CO), que puede ser emitido por diversos orígenes, como el tráfico vehicular, la quema de biomasa y procesos industriales que involucran la quema de hidrocarburos (Jones et al., 2010; Subramanian et al., 2010; Krecl et al., 2017).

En este trabajo se busca establecer la correlación entre las concentraciones de NO_x y CN como un artificio para establecer que las mismas fuentes que generan el NO_x también son las fuentes de CN.

2. Materiales y Métodos

El área de estudio comprendió la zona fronteriza Paso del Norte, la cual abarca las ciudades de El Paso, Texas y Sunland Park, Nuevo México, Estados Unidos y Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Ciudad Juárez cuenta con una población de aproximadamente 1.3 millones de habitantes y para el 2006, contaba con un parque vehicular de 450 mil vehículos, de los cuales el 90% fue adquirido en Estados Unidos y posteriormente introducido al país de manera legal o ilegal (Centro Mario Molina [CMM], 2006).

La estación de monitoreo de calidad del aire IIT-01 está ubicada en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la UACJ (Figura 1), la cual está equipada con analizadores de gases (NO_x, bióxido de azufre, O₃ y CO) y partículas suspendidas menores a 2.5 y 10 micrómetros (PM_{2.5} y PM₁₀), todos de la marca Teledyne (2018, 2020). Dicho equipo realiza mediciones programables cada minuto y lleva a cabo una calibración automática. El control de calidad de los datos se realiza en la estación y los datos se publican de manera continua en el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) operado por el INECC.

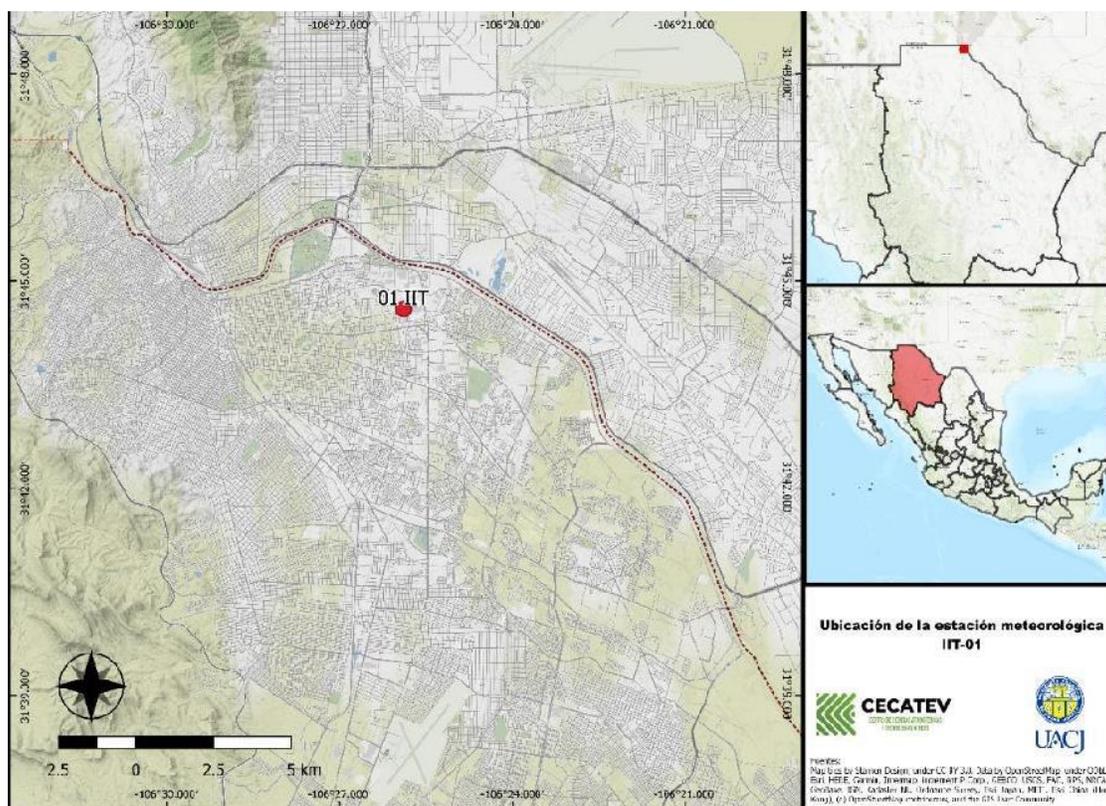


Figura 1. Mapa de localización de la estación de referencia científica IIT-01 operada por la UACJ al norte de Ciudad Juárez, Chih.

Figure 1. Location map for scientific reference station IIT-01 operated by UACJ to the north of Ciudad Juarez, Chih.

El etalómetro portátil es un equipo óptico que realiza mediciones cada cinco minutos y que mide la concentración de CN a siete diferentes longitudes de onda (370 nanómetros [nm], 470nm, 520nm, 590nm, 660nm, 880nm y 950nm). Su funcionamiento se basa en la medición de la atenuación por la absorción de las partículas, este proceso evalúa la masa de CN atrapado en un filtro de fibra de cuarzo, lo que permite determinar el coeficiente de absorción de masa (MAC por sus siglas en inglés). El cálculo del MAC asume que la composición de la masa es de un índice de refracción compleja cercano al del CN puro, sin considerar la influencia de las partículas de polvo, la

incertidumbre asociada se asume consistente en toda la serie del tiempo. En la Tabla 1 se muestran las características de los analizadores y el rango de medición de los equipos utilizados.

Tabla 1. Características de los analizadores en las estaciones de monitoreo.

Table 1. Characteristics of the analyzers in the monitoring stations.

Parámetro	Marca	Tipo de analizador y método de medición	Rango de medición	Calibración	Origen
NO _x ¹	Teledyne	Modelo API T300 Fotometría	0-1 partes por millón (ppm) a 0-1000 ppm	Automática por mezcla de gases	Estados Unidos
CO ₂ ²	Teledyne	Modelo API T200 Quimioluminiscencia	0-50 partes por billón (ppb) a 0-20 ppm	Automática por mezcla de gases	Estados Unidos
CN ³	Magee Scientific	Modelo Etalómetro AE42-7-ER Atenuación óptica	0-1300 microgramos sobre metro cúbico ($\mu\text{g m}^{-3}$) a 880 nm	Automática por el método Malissa- Novakov	Estados Unidos

Fuente: Teledyne API, (SF)¹. Teledyne API, (2018)². Magee Scientific. (2019)¹

Source: Teledyne API, (SF)¹. Teledyne API, (2018)². Magee Scientific. (2019)¹

Los análisis del CN se realizaron utilizando la longitud de onda en el infrarrojo cercano (NIR) de 880nm. Si bien las fracciones cercanas al ultravioleta (UV) con longitudes de onda menores a 440nm son más sensibles a los procesos de añejamiento de las partículas de CN, es en el NIR es donde se puede observar el CN “fresco”. Esto es consistente con las mediciones que se realizan en las principales estaciones de medición de CN para fines comparativos (Dumka et al., 2018).

La campaña de muestreo tuvo una duración de cinco meses, comenzando en octubre del 2018 y finalizando en marzo de 2019. Se tomó el periodo de los meses fríos con el objeto de obtener los registros más altos del año toda vez que es durante la estación de invierno, cuando se observa una mayor estabilidad atmosférica (Baca-Santini y Vázquez-Gálvez, 2015). Los datos obtenidos permitirán establecer la posible asociación de los contaminantes a estudiar con los procesos de generación de estos, ya que se minimiza la dispersión natural por efecto de la estabilidad atmosférica, eliminando así las posibles contribuciones de fuentes remotas como los incendios forestales que son más frecuentes durante la primavera. Esta estrategia ha mostrado ser conveniente en estudios sobre las posibles fuentes de emisión de CN, tanto en zonas urbanas como en zonas rurales y donde se ha encontrado una aparente contribución del sector transporte (Gramsch et al., 2000, Valenzuela et al., 2017; Singh et al., 2018). De esta manera, las fuentes conspicuas de CN se limitan al transporte y la quema de biomasa de manera local y que es más importante durante los meses de octubre a marzo (periodo que observa las temperaturas más frías).

Se recopilaron datos meteorológicos de dirección y velocidad del viento y las principales variables mediante una estación automática Campbell Scientific para el mismo periodo de duración de la campaña de muestreo. Esta estación realiza mediciones cada minuto y la información se encuentra disponible en el portal <http://cecatev.uacj.mx/>

En el análisis de los datos se utilizó el paquete de librerías OpenAir del programa estadístico de programación R, en el cual facilita la manipulación de los datos de fuentes heterogéneas y generar gráficos para el mejor análisis del comportamiento del CN en diferentes periodos de tiempo,

incluyendo la facilidad de producir gráficos polares para observar la relación entre las concentraciones, dirección y velocidad de viento (Carslaw y Ropkins, 2012).

El análisis de datos requirió de la eliminación de algunos que no correspondían con la monotonía de la tendencia de estos, descartándose aquellos que tuvieran dos desviaciones estándares, como lo indican Young (1962) y Kutzner Et al., (2018). De igual forma se eliminaron datos iguales a cero y negativos, los cuales se generaron por procedimientos internos asociados con calibraciones automáticas y manuales de los equipos, así como pruebas internas de calidad (Dumka et al., 2018). Las fuentes de emisión se determinaron a partir de correlaciones de Spearman (Ec. 1) entre CN y los contaminantes criterio elegidos. Este es un coeficiente no paramétrico robusto que permite ciertos desvíos del patrón normal. La función es evaluar la relación lineal entre dos variables a nivel ordinal y que esta relación no sea debida al azar; es decir, que la relación sea estadísticamente significativa (Restrepo et al., 2007).

$$\rho(x, y) = 1 - \frac{6\sum D^2}{N(N^2-1)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde D es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de $x - y$. N es el número de parejas de datos (Restrepo et al., 2007).

Para generar los gráficos para evaluar el comportamiento temporal de los contaminantes, fue necesario realizar la normalización de estos. Lo anterior con el fin de mejorar la visualización de los datos, ya que las unidades de medida por norma son diferentes para cada contaminante. Para el caso del carbono (CO) se mide en ppm, el NOx en ppb y el CN en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

3. Resultados y Discusión

De acuerdo con el análisis de 33,290 datos para cada uno de los parámetros, se observó que la concentración de CN se presentó en un rango de promedio diario durante la campaña de entre 0.768 y 1.150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, observando una prevalencia mayor a 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ los miércoles, jueves y viernes y una disminución los fines de semana (Tabla 2). El CN al no ser incluido un contaminante criterio no existen valores normados, sin embargo, es importante considerar que la presencia de CN se encuentra incluido en el análisis del PM_{2.5}, el cual está formado primordialmente por gases y por material proveniente de la combustión. En términos generales, las partículas están formadas por un núcleo de carbono y por compuestos orgánicos e inorgánicos, adheridos a su superficie. Los límites máximos permisibles para la evaluación de este contaminante están dados por la NOM-025-SSA1-2014, la cual establece un límite de 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ como promedio en 24 horas (h) (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2014). Bajo este esquema, se observa que las concentraciones obtenidas no sobrepasan el límite de promedio en 24 horas.

En la Figura 2 se observa un patrón de comportamiento que obedece a las densidades de flujo típicas de grandes ciudades (Peralta et al., 2019), lo que refuerza la hipótesis de que la mayor contribución de CN es por parte de la flota vehicular, ya que los picos de contaminación se registraron a las horas características de mayor tráfico vehicular en la zona de estudio, siendo consistentes en los días hábiles y disminuyendo en los fines de semana.

Tabla 2. Concentraciones de CN, CO y NOx medidas por la TELEDYNE y etalómetro durante la campaña de muestreo.

Table 2. Concentrations of CN, CO and NOx measured by TELEDYNE and ethalometer during the sampling campaign.

Día	CN ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	CO (ppm)	NOx (ppb)
Lunes	0.921±0.98	0.279±0.33	29.308±28.94
Martes	0.935±1.01	0.287±0.37	30.189±33.20
Miércoles	1.027±1.08	0.313±0.39	33.946±35.63
Jueves	1.150±1.19	0.333±0.36	36.739±37.06
Viernes	1.061±1.21	0.312±0.40	33.423±35.23
Sábado	0.898±1.09	0.306±0.37	28.572±32.37
Domingo	0.768±0.86	0.272±0.30	21.353±20.14

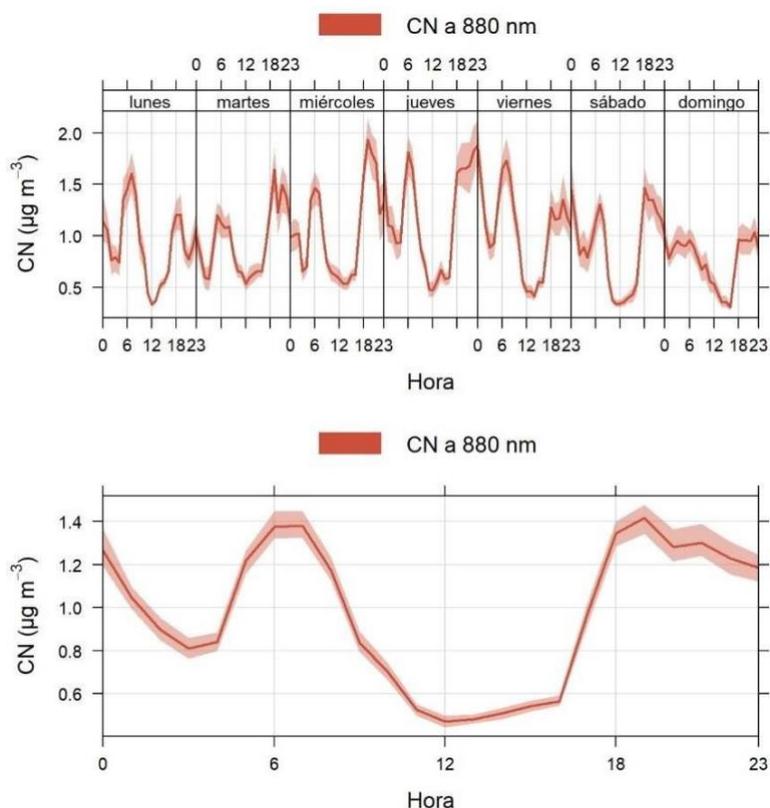


Figura 2. Tendencia de CN en lapsos de una semana y de 24 horas. El sombreado representa 95% de intervalo de confianza, determinado a través del método bootstrap resampling, integrado en la función Time Variation de OpenAir.

Figure 2. CN trend in one-week and 24-hour periods. The shading represents a 95% confidence interval, determined through the bootstrap resampling method, built into the OpenAir Time Variation function

Las concentraciones de NOx mostradas en la Tabla 2, indican que las concentraciones oscilaron entre 21.353 y 36.739 ppb y para CO fueron entre 0.272 y 0.333 ppm. En la Figura 3 y la Figura 4 se hace una comparativa de las tendencias de los tres contaminantes en diferentes escalas y periodos de

tiempo. Los picos de mayor concentración observada concuerdan con las horas de mayor tráfico vehicular en Ciudad Juárez, las cuales son de 6:30 a 8:30 horas y de 15:00 a 16:30 horas, además de observar una tendencia a episodios de mayor concentración durante la noche lo que puede estar relacionado con la capa límite planetaria y el enfriamiento nocturno (Dumka et al., 2018). Igualmente, se identificó un incremento relevante de concentraciones los miércoles para el caso de los tres contaminantes y los jueves solo para el CN, considerando una semana típica del periodo de muestreo, sin embargo, no se identificó la causa de dicho incremento.

Estudios realizados por Singh et al., (2018) muestran el efecto de la contribución de CN atmosférico por efecto del tráfico, de la misma manera, se observó un patrón diurno similar con picos de concentración de CN en la mañana y en la noche, por lo que concluyeron que el mayor flujo de tráfico produce mayores concentraciones atmosféricas de CN a lo largo del día; así como esta investigación, la realizada por Sharma et al., (2018) coincide con el análisis diurno y semanal donde se expresan horarios significativos por la mañana y por la noche, presentando una contribución significativa de la emisión de vehículos, mostrando un patrón definido con el volumen del flujo de tráfico.

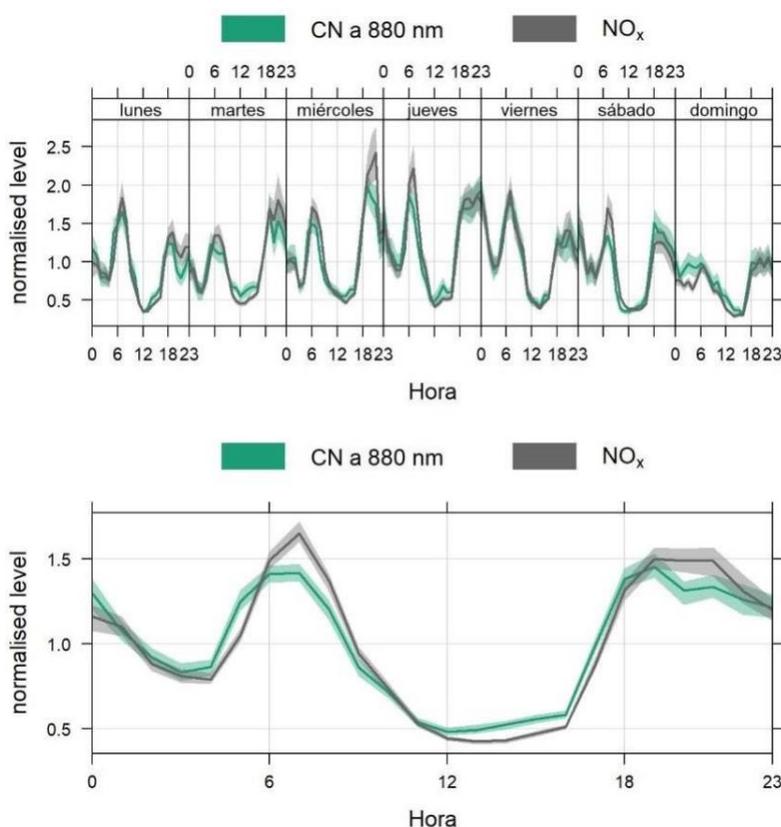


Figura 3. Tendencia de CN y NOx en lapsos de una semana y de 24 horas. El sombreado representa 95% de intervalo de confianza determinado a través del método bootstrap resampling, integrado en la función Time Variation de OpenAir.

Figure 3. CN and NOx trend in one-week and 24-hour periods. The shading represents the 95% confidence interval determined through the bootstrap resampling method, built into the OpenAir timeVariation function

La normativa mexicana, considera la NOM-021-SSA1-1993 para determina el valor permisible para la concentración de CO en el aire ambiente, indicando que este, como contaminante atmosférico, no

debe rebasar el valor permisible de 11 ppm, en promedio móvil de ocho horas una vez al año, como protección a la salud de la población susceptible (DOF, 1994). De acuerdo con lo registrado en la Tabla 2, se observa que no hubo días en los que se sobrepasara el límite permisible. Por otro lado, la misma normativa no contempla el análisis de NO_x, sin embargo, si considera la evaluación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂). Este compuesto es considerado un contaminante primario, el cual deriva de los procesos de combustión, siendo ésta la fuente principal de su vertimiento a la atmósfera. Además de jugar un doble papel en materia medio ambiental, ya que es conocido su efecto potencialmente dañino de manera directa, pero también es uno de los precursores del ozono troposférico. Conforme a lo indicado en la NOM-023-SSA1-1993 sobre los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al NO₂, y si se asume que las mediciones de NO_x realizadas en este estudio corresponden en su totalidad a NO₂, se considera que no sobrepasan el límite permisible de 11 ppm (Secretaría de Salubridad y Asistencia [SSA], 1994).

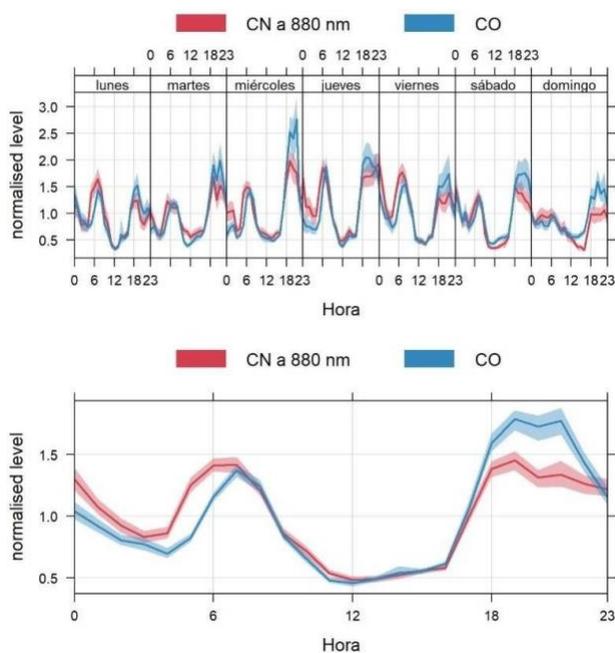


Figura 4. Tendencia de CN y CO en lapsos de una semana y de 24 horas. El sombreado representa 95% de intervalo de confianza determinado a través del método bootstrap resampling, integrado en la función Time Variation de OpenAir.

Figure 4. CN and CO trend in periods of one week and 24 hours. The shading represents the 95% confidence interval determined through the bootstrap resampling method, built into the OpenAir Time Variation function.

En relación con la correlación, Ramos-Herrera et al., 2010 indicaron que una correlación de $R < 0.6$ son consideradas significativas para el análisis de contaminantes atmosféricos. El análisis de correlación de Spearman mostró una alta correlación entre el CN y el NO_x ($R=0.794$), seguida de la correlación entre el NO_x y el CO ($R=0.738$) y finalmente la relación entre el CN y el CO ($R=0.704$). Este análisis muestra una asociación entre los contaminantes, con el fin de predecir la posible fuente potencial de CN en la región.

De acuerdo con estos resultados se infiere que la correlación entre el CN y el NO_x, establece que la fuente de la emisión de CN está asociada al tráfico vehicular y a los combustibles fósiles que utilizan,

ya que la principal fuente de NO_x es el transporte vehicular (Jones et al., 2010; Subramanian et al., 2010; Krecl et al., 2017). Estos resultados son consistentes con otros estudios, como el de Vanderstraten Et al., (2011), los cuales, según en estudios realizados en Bruselas, Bélgica, reportaron una mejor correlación entre CN y NO en comparación a la relación existente entre las partículas y el CO. Raju et al., (2011) mencionan que la variación diurna presentada en la concentración de CN se relaciona a actividades antropogénicas, ya que la correlación mostrada del CN con otros aerosoles originados por actividades antropogénicas, indican una posible fuente común. Mientras que Peralta et al., (2019) reportaron valores para ciudades mexicanas de correlación aceptables para las concentraciones de CO y CN de $R=0.76$ a $R=0.84$ y para CO y $\text{PM}_{2.5}$ de $R=0.70$ a $R=0.76$.

El CO puede ser producido tanto por la quema de biomasa como por el uso de combustibles fósiles (Subramanian et al., 2010) y dado la relación dada entre CO y NO_x ($R=0.738$) se considera que las concentraciones de CO medidas por la estación IIT-01 provienen principalmente por el tráfico vehicular. Es importante mencionar que de acuerdo con la relación que se obtuvo entre el CN y el CO ($R=0.704$), el análisis de CO reportado por diversas estaciones servirá como una herramienta que permitirá construir una línea de base de concentración de CN para otras estaciones de monitoreo en la cuenca. Inclusive, se contempla utilizar estos resultados para reconstruir series de tiempo pasado de concentraciones de este contaminante y proponer una línea base que sirva para sustanciar indicadores en las estrategias de mitigación a los contaminantes de vida corta.

Las concentraciones de los contaminantes estudiados y las condiciones meteorológicas se pueden establecer a partir de la estabilidad atmosférica medida como velocidad de viento. Durante la campaña los vientos predominantes provenían del oeste, con una velocidad que oscilo entre los 0 y 11 m.s. La Figura 5 muestra la distribución de los datos bajo diferentes categorías de estabilidad atmosférica (velocidad de viento), de concentraciones de contaminantes y de correlación lineal de CN, NO_x y CO. Con base a la velocidad del viento, entre mayor sea la velocidad, menor será la concentración de los tres contaminantes como consecuencia de la dispersión. Varios estudios han reportado la importancia de conocer los umbrales de dispersión, es decir, la velocidad de viento a partir de la cual las concentraciones de los contaminantes empiezan a considerarse relevantes (Jones et al., 2010; Raju et al., 2011; Bond et al., 2013; Grundström et al., 2015). Esto permitirá inferir posibles episodios de altas concentraciones en relación con pronósticos de viento.

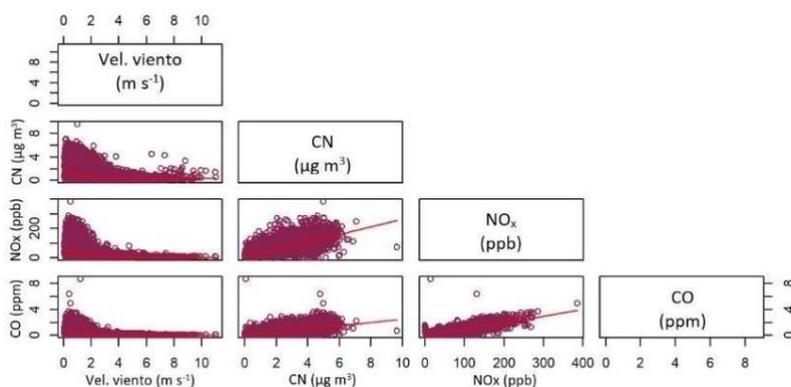


Figura 5. Gráfica de dispersión entre CN, CO, NO_x y velocidad de viento, cada una corresponde a la intersección entre las variables indicadas.

Figure 5. Dispersion graph between CN, CO, NO_x and wind speed, each one corresponds to the intersection between the indicated variables.

La influencia de advección en las concentraciones de contaminantes fue determinada por medio de gráficos polares mostradas en la Figura 6, las cuales comparan las concentraciones de los contaminantes con dirección y velocidad de viento y representan visualmente el resultado con técnicas de suavizado sobre un plano cartesiano (Carslaw y Ropkins, 2012). Al igual que en los gráficos de dispersión, se observa que cuando la velocidad del viento es menor, la concentración de los contaminantes aumenta, esto considerando que el punto de monitoreo es el punto de origen del plano. Para el caso del gráfico de CN, se presenta un punto de concentraciones altas provenientes del suroeste, originado por alguna fuente no identificada, pero que coincide con una zona de alto tráfico vehicular y donde confluyen varias vías de camiones de transporte urbano y carga como se muestra en la Figura 7.

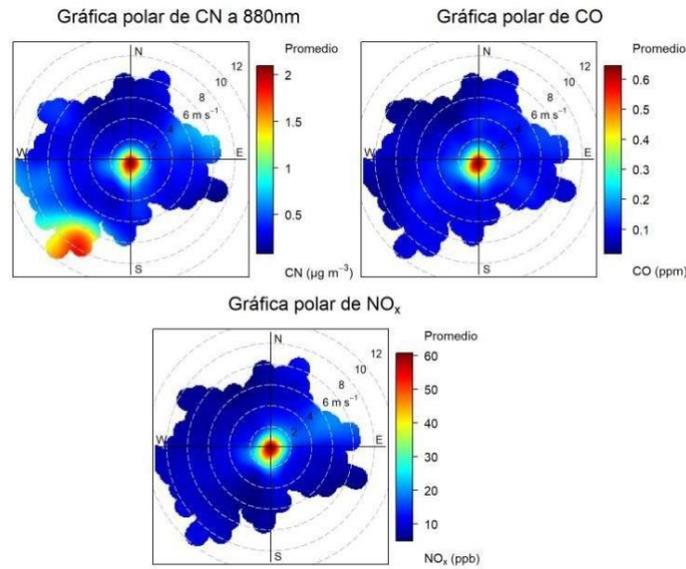


Figura 6. Gráficas polares de CN, CO y NO_x, comparadas con dirección y velocidad de viento.
Figure 6. Polar graphs of CN, CO and NO_x, compared with wind direction and speed

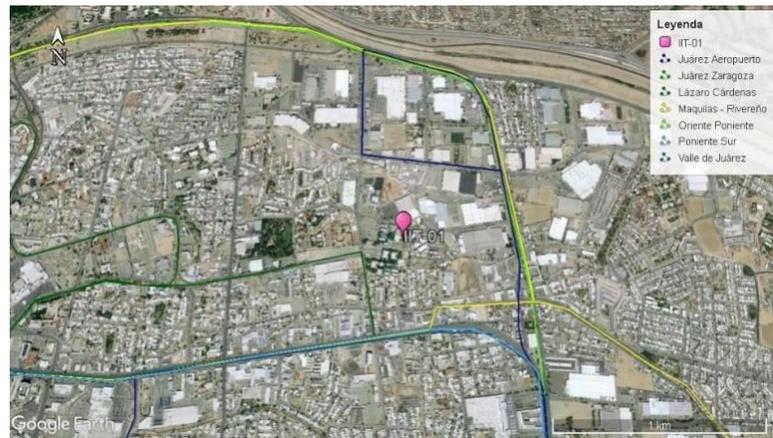


Figura 7. Rutas de transporte público cercanas al área de estudio.
Figure 7. Public transport routes near the study area.

La dispersión del CN por advección está asociada a la exposición potencial de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) que se producen por su atrapamiento en la matriz de carbono, dichas partículas están asociadas con daños oxidativos a nivel celular. Este aspecto fue estudiado con anterioridad en Kelly et al., (2006) y se encontró una asociación entre las emisiones de CN y HAPs en los camiones de Ciudad Juárez. Los HAPs están clasificados como cancerígenos, potencialmente cancerígenos, mutagénicos y pueden generar problemas respiratorios, neurológicos y pulmonares (Pepelko y Ris, 1992), es por ello la importancia de evaluar de manera rápida y estandarizada las emisiones de CN en las ciudades.

4. Conclusiones

Las correlaciones de NO_x y CN y NO_x y CO fueron relativamente altas ($r=0.7$) y considerando que los NO_x son producidos por la quema de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel, se infiere que los tres contaminantes provienen del mismo origen, sin encontrar una aportación exclusiva asociada a la quema de biomasa. Aunado a lo anterior, la tendencia observada de los contaminantes, así como los datos promedio para las 24 horas del día, permite inferir con alto grado de probabilidad que el principal contribuyente de CN es el tráfico vehicular, esto se atribuye a la concordancia entre los picos de concentración con los horarios de mayor afluencia de transporte privado y de personal en Ciudad Juárez.

Debido a la correlación entre CN y CO ($R=0.770$), es posible construir una herramienta para aproximar los valores de CN a partir de valores conocidos de CO, medidos por las estaciones de referencia de la región, lo que a su vez permitirá establecer zonas de mayor impacto por CN y así asociar su prevalencia debido al flujo vehicular y los posibles impactos en poblaciones vulnerables expuestas.

Con respecto a los parámetros meteorológicos, se encontró que la asociación con la velocidad del viento es inversa a las concentraciones de los contaminantes y permite obtener los umbrales de velocidad de viento asociados a altas concentraciones de contaminantes. Lo anterior ayuda a dar un elemento adicional para el establecimiento de planes de contingencia y la protección por la exposición de la población al CN y otros contaminantes criterio, considerando el comportamiento de estos en el tiempo y su interacción con algunos parámetros meteorológicos.

Las concentraciones de los tres contaminantes se encontraron por debajo de los niveles indicados por la normativa mexicana, sin embargo, es importante recalcar que esta normativa no considera al CN como contaminante a evaluar. Para este contaminante se hizo una comparativa con la NOM-025-SSA1-2014 que es utilizada para evaluar la concentración del $\text{PM}_{2.5}$, ya que el CN forma parte de este contaminante. Lo mismo sucedió con el NO_x , la normativa mexicana considera solo al NO_2 como contaminante, por lo que se asumió que los niveles de NO_x provenían exclusivamente de NO_2 .

Algunas de las recomendaciones realizadas para posteriores estudios es la ampliación en la duración de la campaña de monitoreo, con el fin de incluir todas las estaciones del año, con esto se pretenderá hacer una comparativa en las aportaciones de CO y verificar que efectivamente la quema de biomasa no contribuye significativamente en las concentraciones de CN.

Así mismo y dada la repercusión que tienen estos contaminantes en la salud, se recomienda hacer un análisis epidemiológico en los usuarios del transporte de urbano, ya que en la zona donde se detectó una mayor concentración de CN, se caracteriza por una alta afluencia de este tipo de vehículos.

Finalmente, en el futuro cercano se pretende estudiar el efecto de las partículas incluyendo el CN como forzante del clima y su efecto en las temperaturas de la región.

5. Referencias

- Baca-Santini, C. E. y Vázquez-Galvez, F.A. (2015). Estudio comparativo de la influencia de las zonas arboladas urbanas en la calidad del aire de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua* 9(3):171-179.
- Blackman, A., Shih, J. S., Evans, D., Batz, M., Newbold, S. y Cook, J. (2006). The benefits and costs of informal sector pollution control: Mexican brick kilns. *Environment and Development Economics* 11(5):603–627. <http://doi.org/10.1017/S1355770X06003159>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, J. D., Storelvmo, T. y Warren, S. G., Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(11):5380-5552. <http://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Cape, J. N., Coyle, M. y Dumitrean, P. (2012). The atmospheric lifetime of black carbon. *Atmospheric Environment* 59:256–263. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.030>
- Carlaw, D. C. y Ropkins, K. (2012). Openair — An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software* 27(28):52–61.
- Centro Mario Molina (CMM). (2006). Medición de emisiones vehiculares en Ciudad Juárez Chihuahua. <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/HASH28426ef774e85945427e47/ai030.pdf?sequence=3>
- Chand, M., Kumar, V., Kumar, R., Umer, S., Chakrawarthy, E. y Acharya, P. (2018). Urban Climate Seasonal characteristics of black carbon aerosol mass concentrations and influence of meteorology, New Delhi (India). *Urban Climate* 24:968–981.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA-1994, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, monóxido de carbono (CO), Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en el ambiente, como medida de protección a la salud de la población. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=466131&fecha=18/01/1994
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2014). Norma Oficial Mexicana NO-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014
- Díaz Hernández, C.G. (2016). Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos (tesis de posgrado), Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. México.
- Dumka, U. C., Kaskaoutis, D. G., Tiwari, S., Safai, P. D., Attri, S. D., Soni, V. K., Singh, N. y Mihalopoulos, N. (2018). Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to black carbon concentrations in Delhi during winter. *Atmospheric Environment* 194:93–109. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.033>
- Gramsch, E., Catalán, L., Ormeño, I. y Palma G. (2000). Traffic and seasonal dependence of the light absorption coefficient in Santiago de Chile. *Applied Optics*, 39(27):4895–901. <http://doi.org/10.1364/AO.39.004895>
- Grundström, M., Hak, C., Chen, D., Hallquist, M. y Pleijel, H. (2015). Variation and co-variation of PM10, particle number concentration, NOx and NO2 in the urban air -Relationships with

- wind speed, vertical temperature gradient and weather type. *Atmospheric Environment* 120(2):317-327. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.057>
- Hussain, S. N., Rao, T. C., Balakrishnaiah, G., Rama, G. K., Reddy, K. R. O., Reddy, N. S.K., Reddy, T. L., Kumari, S. P., Reddy, P. E. y Reddy, R. R. (2018). Investigation of black carbon aerosols and their characteristics over tropical urban and semi-arid rural environments in peninsular India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 167:48–57. <http://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.010>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate change 2014. Synthesis report. Versión inglés. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 169 p.
- Ježek, I., Blond, N., Skupinski, G. y Močnik, G. (2018). The traffic emission-dispersion model for a Central-European city agrees with measured black carbon apportioned to traffic. *Atmospheric Environment* 184:177–190. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.028>
- Jones, A. M., Harrison, R. M. y Baker, J. (2010). The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment* 44(13):1682–1690. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.007>
- Kalluri, R. O. R., Gugamsetty, B., Kotalo, R. G., Nagireddy, S. K. R., Rao, C. R., Tandule, L. R., Thotli, L., Shaik, N. H., Maraka, V. R., Rajuru, R. R. y Nair, S.B.S. (2017). Seasonal variation of near surface black carbon and satellite derived vertical distribution of aerosols over semi-arid station in India. *Atmospheric Research* 184:77–87. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.003>
- Kelly, K., Wagner, D., Lighty, J., Núñez, M. Q., Vazquez, F. A., Collins, K. y Barud-Zubillaga, A. (2006). Black carbon and polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from vehicles in the United States-Mexico border region: pilot study. *Journal of the Air and Waste Management Association* 56(3):285–293. <http://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464465>
- Krecl, P., Johansson, C., Targino, A. C., Ström, J. y Burman, L. (2017). Trends in black carbon and size-resolved particle number concentrations and vehicle emission factors under real-world conditions. *Atmospheric Environment* 165:155–168. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.036>
- Kotu, V. y Bala, D. (2019.) Chapter 3 - Data Exploration. En *Data Science: Concepts and Practice* (pp. 39–64). Morgan Kaufmann.
- Kutzner, R. D., von Schneidmesser, E., Kuik, F., Quedenau, J., Weatherhead, E. C. y Schmale, J. (2018). Long-term monitoring of black carbon across Germany. *Atmospheric Environment* 185:41–52. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.039>
- Lim, S., Faïn, X., Zanatta, M., Cozic, J., Jaffrezo, J., Ginot, P. y Laj, P. (2014). Refractory black carbon mass concentrations in snow and ice: method evaluation and inter-comparison with elemental carbon measurement. *Atmospheric Measurement Techniques* 7(10):3307–3324. <http://doi.org/10.5194/amt-7-3307-2014>
- Long, C. M., Nascarella, M. A. y Valberg, P.A. (2013). Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution* 181:271–286. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009>
- Magee Scientific. (2018). Operation Manual Black Carbon Photometer. https://twobtech.com/docs/manuals/model_BCP_revA-2.pdf
- Molina, L. T. (2010). Policy Case Study: Ciudad Juarez Brick-makers' Project (tesis de posgrado), University of London.
- Molina, M., Zaelke, D., Sarma, K. M., Andersen, S. O., Ramanathan, V. y Kaniaru, D. (2009). Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(49):20616–20621. <http://doi.org/10.1073/pnas.0902568106>

- Novakov, T. y Hansen. J.E. (2004). Black carbon emissions in the United Kingdom during the past four decades: an empirical analysis. *Atmospheric Environment* 38(25):4155–4163.
- Pepelko, W., y Ris, C. (1992). Update on U.S. Environmental Protection Agency Activities in the Assessment of Mobile Sources Air Toxics. En *Toxic Air Pollutants from Mobile Sources: Emissions and Health Effects* (pp. 193–200). Pittsburgh: Air and Waste Management Association.
- Peralta, O., Ortíz-Alvarez, A., Basaldud, R., Santiago, N., Alvarez-Ospina, H., De la Cruz, K., Barrera, V., Espinosa, M. L., Saavedra, I., Castro, T., Martínez-Arroyo, A., Páramo, V. H., Ruíz-Suárez, L. G., Vázquez-Gálvez, F. A. y Gavilán, A. (2019). Atmospheric black carbon concentrations in Mexico. *Atmospheric Research* 230: 104626. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104626>
- Raju, M. P., Safai, P., Rao, P. S. P., Devara, P. C. S. y Budhavant, K.B. (2011). Seasonal characteristics of black carbon aerosols over a high altitude station in Southwest India. *Atmospheric Research* 100(1):103–110. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.01.006>
- Ramos-Herrera, S., Bautista-Margulis, R. y Valdez-Manzanilla, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona nortes de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia, Trópico Húmedo* 26(1):65-80.
- Resquin, M. D., Santágata, D., Gallardo, L., Gómez, D., Rössler, C. y Dawidowski, L. (2018). Local and remote black carbon sources in the Metropolitan Area of Buenos Aires. *Atmospheric Environment* 182:105–114. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.018>
- Restrepo, L. F., González, J. (2007). De Pearson a Spearman, *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20(2): 183-192.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. Intended Nationally Determined Contribution: Mexico. Ciudad de México. 21 p.
- Secretaría de Salud y Asistencia (SSA) (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-023.SSA1-1993. salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html>
- Sharma, M. C., Pandey, V. K., Kumar, R., Latief, S. U., Chakravarthy, E. y Acharya, P. (2018). Seasonal characteristics of black carbon aerosol mass concentrations and influence of meteorology, New Delhi (India). *Urban Climate* 24: 968-981. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.002>
- Singh, V., Ravindra, K., Sahu, L. y Sokhi, R. (2018). Trends of atmospheric black carbon concentration over United Kingdom. *Atmospheric Environment* 178:148–157. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.030>
- Subramanian, R., Kok, G. L., Baumgardner, D., Clarke, A., Shinozuka, Y., Campos, T. L., Heizer, C. G., Stephens, B. B., de Foy, B., Voss, P. B. y Zaveri, R. A. (2010). Black carbon over Mexico: the effect of atmospheric transport on mixing state, mass absorption cross-section, and BC/CO ratios. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10(1):219–237.
- TELEDYNE API. (2018). Operation Manual Model T300/T300M Carbon Monoxide Analyzer. <http://www.teledyneapi.com/prod/Download/068664D%20%20T300%26T300M%20Manual.pdf>
- TELEDYNE API. (2020). Model T200. <http://www.teledyne-api.com/products/nitrogen-compound-instrument/t200>
- Valenzuela, A., Arola, A., Antón, M., Quirantes, A. y Alados-arboledas, L. (2017). Black carbon radiative forcing derived from AERONET measurements and models over an urban location in the southeastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Research* 191:44–56. [h10.1016/j.atmosres.2017.03.007](http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.007)

Vanderstraeten, P., Forton, M., Brasseur, O. y Offer, Z. Y. (2011). Black Carbon Instead of Particle Mass Concentration as an Indicator for the Traffic Related Particles in the Brussels Capital Region. *Journal of Environmental Protection* 2(5): 525–532. <http://doi.org/10.4236/jep.2011.25060>

Young, H. D. (1962). *Statistical Treatment of Experimental Data*. McGraw-Hill Company, New York.

© 2020 TECNOCENCIA CHIHUAHUA